

# El binomi aigua i energia

Juan Manuel Buil Sanz

Endesa i Universitat Politècnica de Catalunya

## 1

### Introducció

L'aigua és present en la majoria dels processos energètics; s'utilitza fonamentalment de sis maneres diferents, que es poden complementar.

1. *Com a element productor directament d'energia, utilitzant l'energia potencial mitjançant turbines hidràuliques, aprofitant desnivells.* En aquest cas, l'aigua no es consumeix, només canvia de posició. L'energia s'obté segons l'expressió  $E = mgh$ , en què  $m$  és la massa d'aigua,  $g$  la força de la gravetat i  $h$  l'altura del desplaçament. L'energia utilitzable és directament proporcional a la quantitat d'aigua que es canvia de posició i al desnivell del salt. S'inclouen aquí tot tipus d'aprofitaments hidroelèctrics i els antics sistemes amb turbines obertes i sínies multiús que s'empren des de fa molt de temps, i la tecnologia dels quals ha anat millorant lentament, i a l'actualitat ha arribat a rendiments propers al 100%, molt superior

a qualsevol altre sistema de producció d'energia. És un procediment net, respectuós amb el medi ambient i totalment renovable, encara que la seva difusió queda limitada per les aportacions fluvials i els desnivells dels rius.

2. *Com a element transformador de l'energia calorífica en energia mecànica a les màquines de vapor.* L'aigua s'evapora en calderes, utilitzant la pressió d'aquest vapor per moure turbines o pistons. Aquest sistema s'utilitzava en locomotores de vapor, i actualment s'usa en centrals tèrmiques de qualsevol tipus, nuclears, etc. L'aigua actua com a baula necessària per transformar energia calorífica en energia mecànica.
3. *Com a element transmissor en sistemes de calefacció.* Per exemple, el sistema de calefacció per radiadors d'aigua, on l'aigua fa de transmissor de la calor al llarg de tot el circuit i proporciona una qualitat de vida confortable i econòmica.
4. *Com a element refrigerant per completar els cicles tèrmics.* En els cicles de vapor tancats s'exigeix una recuperació de l'estat líquid del vapor per

condensació que es realitza mitjançant refrigeració per aigua en circuit generalment obert o per torres de refrigeració. En el primer cas l'aigua es retorna amb un lleuger increment tèrmic i en el segon es consumeix per evaporació directa a l'atmosfera. Per això l'aigua és vital a totes les grans factories de producció d'energia elèctrica d'origen tèrmic, i és un condicionant imprescindible per a la implantació d'aquest tipus de centrals.

5. *Com a evacuador de l'energia calorífica sobrant.* Per a la refrigeració de grans generadors i motors tèrmics s'usen freqüentment sistemes hidràulics en circuit tancat que transmeten la calor sobrant a l'aigua o directament a l'aire.
6. *Com a element de reg en els cultius energètics.* Des de sempre s'ha utilitzat la fusta com a element combustible, i lògicament fa falta l'aigua. Les últimes tendències en aquest aspecte s'orienten cap a la producció d'energia elèctrica amb diferents tipus de plantes el poder calorífic de les quals, en la combustió, és elevat respecte a la superfície de terreny conreada. Dins d'aquest grup es troben dos subgrups, i tots necessiten l'aigua per obtenir l'energia:
  - Cultius productors de biomassa apropiats per produir calor mitjançant la combustió; entre d'altres, hi ha la llenya sobrant, el card, la piñola, etc.
  - Els biocarburants, olis vegetals i alcohols procedents de la soja, la colza, el gira-sol, etc., que es poden utilitzar en motors de combustió.

El desenvolupament d'aquest tipus de combustible es pot aprofitar molt bé en zones que tinguin Sol i aigua, i poden constituir una alternativa raonable a l'energia fòssil.

Com es pot veure, el binomi aigua-energia és present en pràcticament tots els sistemes que tracten de transformar algun tipus de combustible en energia elèctrica o mecànica. La tecnologia és molt antiga, però és fiable i té un gran rendiment, per la qual cosa continua vigent i ho continuarà sent en el futur.

També s'ha de fer una petita referència a l'aigua de mar, que es pot utilitzar com a element generador d'energia per dos sistemes, el mareomotriu, que aprofita l'energia potencial de la mateixa manera que als rius però amb els petits desnivells de les mareas, i el que produeixen les ones amb una combinació d'energia cinètica i potencial. Aquests sistemes estan poc desenvolupats, principalment perquè la corrosió limita la durada de les instal·lacions, i també perquè els temporals produeixen desperfectes que són molt difícils de contrarestar donant rigidesa a les estructures de suport.

El present article se centra en la utilització de l'aigua per a la producció d'energia i particularment en els usos per a refrigeració de grans grups tèrmics, que són els sistemes que utilitzen més quantitat d'aigua.

Per aclarir un concepte que a vegades s'interpreta malament, cal dir que tota l'energia hidroelèctrica és renovable, tant la generada per grans embassaments com la de les petites centrals denominades minicentrals. Quan es parla d'energies renovables sovint només es té en compte la minihidràulica, però la gran hidràulica no solament és igualment renovable sinó que, a més, és una energia de més qualitat, com veurem més endavant.

## 2

### Història

L'aprofitament de l'energia produïda en un salt d'aigua és molt antic. Els primers artefactes eren simples rodes amb cassons que es movien amb l'aigua que s'hi abocava a la part superior, i amb paletes que s'accionaven per corrents d'aigua. La utilitat inicial va ser per moure rodes de molins de gra i d'olives, que es van anar estenent gradualment a forges en les quals es combinava la manxa i el martell. Van aparèixer a Mesopotàmia i la Xina, i des d'allà van ser adoptats en altres territoris fins a arribar als romans, que van ser els principals mestres en l'ús de l'aigua.

A Espanya els àrabs van desenvolupar un sofisticat sistema de regadius que es fonamentava en captacions

en rius per derivar l'aigua a canals, amb sínies d'ús doble que utilitzaven la força de l'aigua per moure la roda que incloïen cassons per fer-la pujar. El rendiment era baix però sens dubte va ser un avenç ja que integrava en una sola peça el que actualment denominem turbina i bomba.

A l'Edat Mitjana a Europa hi va haver un gran desenvolupament de màquines hidràuliques que es disposaven en salts formats per petites preses que permetien controlar el cabal del riu. S'empraven com en l'antiguitat per moure molins, però en aquest cas la tecnologia era millor i permetia una certa modulació de la potència regulant els cabals. El ventall d'utilització es va incrementar, i els usos arribaven als molins de gra, d'olives, per a pasta de paper, forges, serradores, petits processos industrials, etc.

A Catalunya també hi va haver un gran desenvolupament de l'energia hidràulica fonamentada principalment en els rius Ter, Llobregat, Fresser i Fluvià. Els inicis van ser els mateixos que en la resta d'Europa, que van culminar en la industrialització del segle XIX quan es van formar grans indústries tèxtils al costat del riu, que prenia l'energia per moure els telers, de petits salts hidràulics amb una potència entre 0,5 i 2 MW. La transmissió de la potència als telers s'efectuava mitjançant enfangats connectats amb politges a l'eix principal de la turbina. Aquestes indústries, que superaven el centenar, van ser el fonament del desenvolupament industrial i tecnològic de Catalunya que obtenia de l'aprofitament hidràulic d'aquests rius la major part de l'energia necessària per al correcte funcionament de les seves factories ja que quan els cabals disminuïen era necessari utilitzar màquines de vapor auxiliars.

En el tram del Llobregat entre Berga i Navàs, en només 20 quilòmetres de riu, es van instal·lar quinze indústries amb les colònies respectives.

L'aparició de l'electricitat per a l'ús industrial a finals del segle XIX va accelerar el desenvolupament d'un nou element a la producció d'energia: la hidroelectricitat o energia hidroelèctrica, però la seva implantació no va ser fulminant.

Les primeres centrals de producció elèctrica eren generadors acoblats a màquines de vapor; funcionaven

bé, però amb una inèrcia tal que era difícil ajustar-se al consum, perquè l'escalfament o el refredament no és instantani (cal tenir en compte que tota l'energia elèctrica que es consumeix s'ha de generar en el mateix instant ja que no es pot emmagatzemar com a tal). D'altra banda, en els inicis, el transport d'electricitat no estava resolt, per la qual cosa les centrals de producció s'havien d'instal·lar a les zones de consum. En aquest sentit es pot recordar les centrals que hi havia a Barcelona a l'avinguda Paral·lel i a l'avinguda Vilanova, que subministraven energia a la ciutat.

En les primeres dècades del segle XX, l'elevat increment de consum d'energia elèctrica a la capital i el seu entorn va instar a buscar solucions més competitives de producció, i menys contaminants, ja que l'efecte d'aquestes factories dins de la ciutat feia que la pol·lució dominés totalment l'ambient. A més, el problema d'estabilitat entre producció i consum es feia cada vegada més patent ja que no era possible una regulació absoluta del sistema amb les màquines tèrmiques. La solució es va trobar a les centrals hidroelèctriques, ja que la millora del sistema del transport amb l'alta tensió va permetre construir a les zones que es consideraven de major rendiment.

La primera companyia que va connectar les seves grans hidràuliques amb Barcelona va ser Hidroelèctrica de Catalunya. Va construir la central de Seira, al riu Éssera, el 1911, amb una potència de 24 MW repartits en tres grups iguals. Posteriorment altres empreses van seguir el seu exemple; el 1912 Energia Elèctrica de Catalunya va posar en servei la central hidràulica de Capdella, al riu Flamisell, que captava l'aigua de nombrosos llacs pirinencs. Posteriorment la societat Barcelona Tracció, Light & Power Company Limited, "La Canadiense", va començar a desenvolupar a través de la seva filial Regs i Força de l'Ebre les centrals del riu Segre, amb la central de Serós de 42 MW, que curiosament va emprar per construir-se maquinària usada procedent del Canal de Panamà, que s'acabava d'inaugurar.

Paral·lelament, es va iniciar l'aprofitament del riu Noguera Pallaresa, la concessió del qual havia obtingut Regs i Força de l'Ebre. Es va construir entre 1913 i 1916

el salt de Tarn, de 35,2 MW, amb la presa de gravetat del mateix nom que amb 101 m d'altura va ser en el seu moment la presa més alta d'Europa i la tercera del món. A continuació es va construir el salt de Camarasa, de 60 MW, amb una altra presa de gravetat, però en aquest cas de 108 metres d'altura que tornava a ser la més alta d'Europa i la cinquena del món, ja que durant aquests anys es desenvolupaven molts projectes d'aquest tipus a tot el món. La tecnologia hidroelèctrica punta estava implantada a Catalunya, que en aquell moment disposava dels dos embassaments hidroelèctrics més grans d'Europa.

A Andorra la situació va ser similar, però va tenir un benefici doble. El 1934 es construeix la central hidroelèctrica a Escaldes amb 30 MW de potència, que permet subministrar amb comoditat a tot el Principat i exportar a Espanya l'energia sobrant. Per a la construcció de la central i el transport dels seus equips va ser necessari millorar sensiblement l'accés des de la Seu d'Urgell, carretera que va permetre des de llavors una comunicació fluent amb Catalunya i que va ser l'inici d'un fort desenvolupament del comerç i altres indústries que ha continuat fins avui.

La postguerra va portar una segona onada de construccions hidroelèctriques a Catalunya, però aquesta vegada amb tecnologia pròpia pel que fa a les obres civils. L'aïllacionisme va obligar a buscar solucions adaptades als nostres recursos desenvolupant solucions modernes i duradores. Regs i Força de l'Ebre va acabar el 1948, amb moltes penalitats per manca d'equipament, el salt de Flix (40 MW) a l'Ebre, construcció que havia quedat paralitzada per la contesa.

D'altra banda, el 1947 un insigne enginyer de camins català, Victoriano Muñoz Oms, crea l'empresa ENHER (Empresa Nacional Hidroelèctrica del Ribagorçana) amb la idea d'aconseguir un aprofitament hidroelèctric integral del riu Noguera Ribagorçana que fins llavors no s'havia utilitzat per a aquestes finalitats. Amb molta rapidesa es construeixen les centrals de Senet, Bono, Vilaller, Pont de Suert, Caldes, Boí i els embassaments de Cavallers, Escales i Canelles amb les respectives centrals que en total sumaven una potència de 318 MW. A continuació i fins al 1969 es van

fer els embassaments de Mequinensa (320 MW) i Ribarroja (240 MW) a l'Ebre, que van posar el punt final a les restriccions energètiques que fins llavors patia Catalunya des de la Guerra Civil.

La construcció dels salts del Noguera Ribagorçana va suposar per a la zona un trampolí per al seu desenvolupament, es van millorar sensiblement les comunicacions, i d'aquesta manera es van poder apreciar les meravelles naturals i arquitectòniques creant un gran pol d'atracció turística. Els embassaments construïts per a l'abastament a poblacions també són una font d'energia. Així al riu Ter es construeix l'embassament de Sau (1963), amb una central de peu de presa de 52 MW, i posteriorment Susqueda (1969), amb una central subterrània de 80 MW; al Llobregat s'hi fa l'embassament de la Baells (1976), amb una central de 6,4 MW de potència.

En el període de la postguerra, les indústries tèxtils que tenien turbines antigues amb sistemes de transmissió mecànics es van modernitzar, van instal·lar petits grups hidroelèctrics connectats a la xarxa de distribució, i van muntar motors elèctrics per fer funcionar els seus equips fabrils. Posteriorment, algunes fàbriques van tancar però van mantenir la seva central hidroelèctrica connectada a la xarxa.

Una història a part és la de les petites centrals hidroelèctriques en xarxa aïllada que subministraven directament a petits pobles. Eren centrals manuals quant a la seva regulació i manteniment amb molt cost de personal, i quan les xarxes de distribució locals es van integrar a la xarxa global van deixar de funcionar i es van abandonar. Posteriorment amb l'arribada d'una tecnologia d'automatismes assequible han tornat a funcionar i han injectant la seva energia directament a la xarxa. Una gran part de les minicentrals actuals té aquest origen.

L'energia hidroelèctrica subministrava durant els primers anys de la postguerra gairebé tota l'energia que es consumia a Espanya. L'important desenvolupament econòmic va fer patent un gran increment del consum elèctric, de manera que a finals dels anys seixanta es va arribar al límit de l'aprofitament hidroelèctric dels grans rius, per la qual cosa des d'aquell

moment van ser necessaris altres elements de producció d'energia amb diversos combustibles (carbó, fuel, gas, nuclear), i en l'actualitat s'ha completat la demanda amb energies renovables (eòlica i solar). Aquestes últimes estan assolint un gran desenvolupament però amb limitacions pel que fa a la regulació, que de moment només es pot fer amb la col·laboració de la gran hidràulica.

## 3

## El present

Abans de començar a descriure les últimes realitzacions, i més modernes, en el camp hidroelèctric, cal esmentar algunes de les necessitats que requereixen les xarxes de distribució elèctrica, i els avantatges que poden aportar les centrals hidràuliques.

En un sistema elèctric hi ha d'haver un equilibri global constant, ja que l'energia que es produeix és la mateixa que es consumeix. Si hi hagués un desequilibri es transmetria a la tensió i a la freqüència del sistema, de manera que aquests paràmetres variarien i automàticament es corregiria aquest desequilibri energètic. La realitat és que la producció s'adapta al consum, per la qual cosa si el desequilibri es produeix per augment d'energia generada s'incrementa la tensió i la freqüència, i ocorre al contrari quan el sistema productor d'energia no pot satisfer l'energia demandada.

Com és natural una xarxa elèctrica ja preveu tot això. La tensió està prefixada per endavant i la freqüència ha de mantenir-se constant en els 50 hertz que requereix el sistema. Si la tensió es manté constant, qualsevol desequilibri es transmet directament a la freqüència, de manera que si es genera més energia que la que es necessita la freqüència puja, i si se'n genera menys la freqüència baixa. Per equilibrar fàcilment aquest binomi només cal mantenir constant la freqüència, donant més potència de generació si la freqüència tendeix a baixar i menys potència si tendeix a pujar. Sembla molt complicat, però simplificant només cal mantenir els 50 hertz de freqüència del corrent altern de la xarxa.

En un sistema modern de subministrament d'energia elèctrica ocorre el següent. Les centrals nuclears no poden variar la seva potència a curt termini per la qual cosa sempre mantenen un règim constant. Les centrals tèrmiques de qualsevol tipus tenen molta inèrcia i no poden pujar ni baixar potència amb rapidesa. Els parcs eòlics i fotovoltaics produeixen d'acord amb el vent o de la insolació; treballen sense regulació possible. Llavors qui regula el sistema? Les hidràuliques, evidentment. Però totes les hidràuliques? No, només les hidràuliques amb embassament permeten una regulació total.

Les turbines hidràuliques, com s'ha indicat en la introducció, donen una potència directament proporcional a la massa d'aigua que canvia la seva posició i al salt (desnivell) que aprofiten. El salt es manté fix en curts espais de temps (els nivells d'embassament varien lentament), per la qual cosa si es fa variar el cabal que passa per una turbina hidràulica es farà variar la potència directament. Per això hi ha en el sistema unes centrals hidràuliques de regulació (amb embassament) que estan contínuament pendents de la freqüència de la xarxa, de manera que si la freqüència baixa dels 50 hertz, s'obre el distribuïdor d'aigua perquè entri més cabal i augmenti la potència, i d'aquesta manera es restableixi l'equilibri, i si la freqüència puja, perquè hi ha menys demanda d'energia, llavors es tanca el distribuïdor, perquè entri menys aigua, es generi menys potència i es restableixin els 50 hertz i, de nou, s'obtingui l'equilibri de la xarxa. Qualsevol grup hidràulic pot variar del mínim al màxim de la seva potència i viceversa en poc més de 15 segons la qual cosa el converteix en la màquina adequada per mantenir l'equilibri entre producció i consum, i que estabilitza contínuament la xarxa elèctrica.

Una altra necessitat del sistema elèctric és la injecció d'energia instantàniament quan hi ha algun error per l'avaria de qualsevol element productor. La problemàtica està lligada amb el que hem descrit en paràgrafs anteriors, ja que en exigir l'equilibri de potències a la xarxa, si falla un equip ha de ser instantàniament substituït per un altre. Aquesta situació queda igualment compensada per les hidràuliques amb regulació.

Hi ha grups hidràulics que funcionen girant al buit (sense potència) acoblats a la xarxa, de manera que quan hi ha un error en alguna central, automàticament generen la potència que fa falta i equilibren la freqüència.

Es pot ressaltar que la freqüència va associada directament a les revolucions del grup generador, per tant una turbina hidràulica amb regulació l'únic que ha de fer és mantenir fixes les seves revolucions nominals, i disminuir el cabal quan tendeix a accelerar-se i augmentar-lo quan es frena. Antigament aquest equilibri es feia amb reguladors mecànics de velocitat que tenien una petita inèrcia, amb un rang de freqüències d'explotació d'entre 48 i 52 hertz i fins i tot més. En l'actualitat els reguladors són electrònics i la seva inèrcia és molt baixa per la qual cosa la precisió és molt més elevada i els rangs de freqüència queden limitats en condicions normals entre 49,5 i 50,5 hertz, per tant la qualitat de l'energia abocada a la xarxa és molt millor (les persones d'una certa edat recordaran que els antics receptors de televisió necessitaven un estabilitzador de la xarxa que tenia la funció d'evitar aquestes distorsions).

En l'actualitat tot el sistema està interconnectat amb les línies d'alta tensió de la Red Eléctrica Española (REE) i les grans centrals hidràuliques amb regulació són les que han d'estabilitzar el sistema i resoldre la majoria dels problemes que es produeixen per l'avaria d'altres elements generadors.

Per analitzar el paper que tenen les centrals hidràuliques en el sistema elèctric és necessari descriure breument els tipus d'aprofitament possible.

### 3.1

## Tipus de centrals hidràuliques

### Centrals fluents

En aquestes centrals es deriva l'aigua del riu per un canal que va guanyant desnivell respecte al riu, l'aigua torna al seu curs original i s'aprofita l'energia generada en aquest salt. Una part de l'aigua que ve pel riu s'hi manté com a cabal ecològic, i la resta, fins a la

màxima capacitat del canal, s'utilitza per a la producció d'energia. En el cas de grans crescudes el cabal que no pot circular pel canal continua pel riu i no se n'aprofita el potencial energètic.

Aquestes centrals són rígides quant a la seva producció, i generen energia de manera proporcional al cabal que circula pel canal, sense cap possibilitat de regulació llevat que tinguin una gran cambra de càrrega que permetria una certa regulació, encara que molt limitada. L'energia produïda s'utilitza com a base, i s'integra directament a la xarxa en la seva totalitat.

### Centrals amb regulació

Les centrals amb regulació requereixen la construcció de preses que permeten la formació d'un embassament. L'aigua s'emmagatzema a l'embassament i es desguassa a través de les turbines quan fa falta l'energia. El salt d'aigua utilitzat és variable i depèn de com n'estigui de ple aquest embassament; la potència requerida s'obté adequant el cabal obrint o tancant el distribuïdor de la turbina, i pot augmentar o disminuir independentment del cabal que arribi a l'embassament. En el cas de fortes crescudes l'aigua es pot emmagatzemar per deixar-la anar posteriorment quan la demanda d'energia ho requereixi.

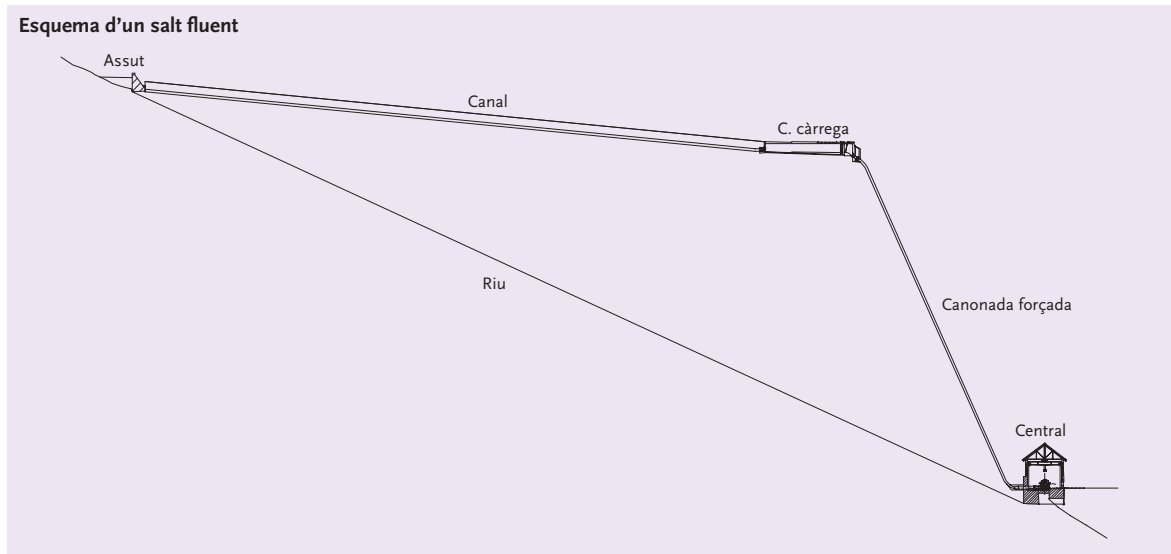
La central amb els seus grups se sol disposar al peu de la presa, encara que es pot situar aigua avall connectada amb l'embassament mitjançant unes conduccions de pressió. A Catalunya hi ha nombroses centrals d'aquest tipus, i l'aigua de l'embassament s'utilitza també per a altres usos com el proveïment i els regadius.

L'energia d'aquestes centrals s'utilitza en hores punta i per regular el sistema elèctric. També es disposa com reserva freda per subministrar energia quan fallen altres elements de producció.

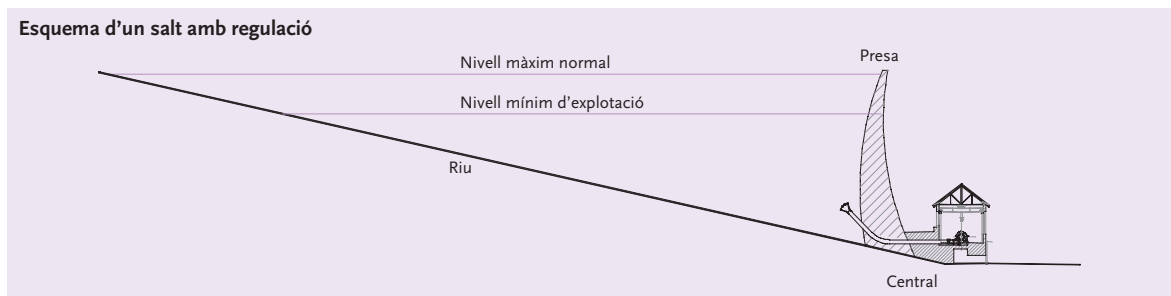
### Centrals de bombament reversibles

El fonament d'aquestes centrals és fer pujar l'aigua fins a un dipòsit superior consumint energia sobrant o de baix cost (hores vall) i produir energia quan sigui necessària turbinant l'aigua cap a un dipòsit inferior.

Gràfic 1



Gràfic 2

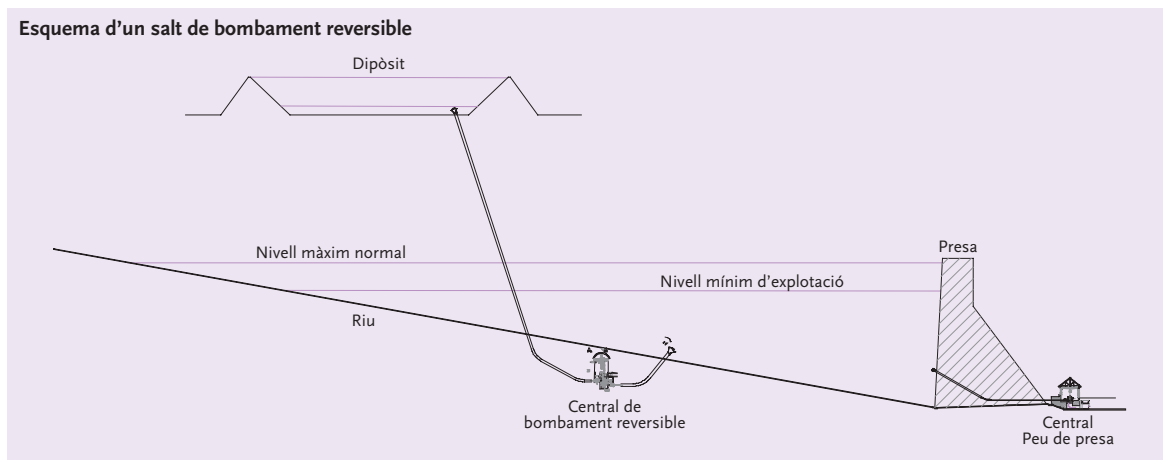


L'aprofitament hidroelèctric consta de dos dipòsits o embassaments disposats a diferents nivells connectats mitjançant un circuit hidràulic a pressió. A la part inferior d'aquest circuit es disposa d'una central amb grups reversibles que permeten bombar l'aigua girant en un sentit, consumint energia elèctrica en un motor acoblat a turbobomba; quan fa falta energia es fa circular l'aigua cap al dipòsit inferior, i girant el grup en sentit contrari es genera l'energia al propi motor, que alhora fa de generador. Les màquines hidràuliques són molt sofisticades, i en els últims anys han millorat notablement el seu rendiment. En l'actualitat per cada 1.000 kWh consumits en bombament es poden gene-

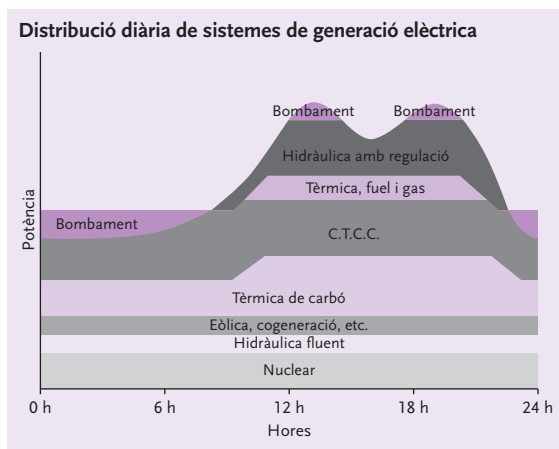
rar fins a 770 kWh, que suposa un rendiment net global del 77%, molt superior a qualsevol altre tipus d'emmagatzemament d'energia elèctrica massiu.

L'aigua es bomba principalment a la nit i durant els caps de setmana, i l'energia consumida es recupera mitjançant la generació d'energia en hores punta. Com en el cas de les centrals amb regulació, l'energia d'aquestes centrals s'utilitza com a reserva freda. La construcció d'aquest tipus de centrals es va iniciar a Espanya durant els anys setanta, com a complement de les centrals nuclears. Actualment el seu ús es combina amb l'energia eòlica i fotovoltaica, col·laborant en l'emmagatzemament de l'energia sobrant, en la

Gràfic 3



Gràfic 4



continua regulació d'aquesta energia i en el subministrament per falta de vent.

### 3.2

#### Utilització de les centrals hidràuliques

En el gràfic 4 es pot apreciar com es distribueix la demanda d'energia un dia convencional i quins tipus d'energia cobreixen aquesta demanda.

En la part inferior es pot veure com l'energia nuclear és la primera que es despatxa en el sistema. El motiu és clar, no se'n pot variar la potència quan està en fun-

cionament. El segon grup el componen les renovables rígides sense regulació, és a dir, les que si paren perden el recurs energètic que estan utilitzant. En aquest paquet hi ha les eòliques, les fotovoltaïques i les hidràuliques fluents, i també s'hi inclou l'energia procedent de cogeneració perquè la seva generació és igualment rígida, concorde al sistema de la indústria associada.

El tercer grup són les tèrmiques de carbó, centrals amb molta inèrcia que poden pujar i baixar de càrrega lentament, sempre molt controlades i amb planificació a mitjà termini. Les centrals de cicle combinat utilitzen gas natural per funcionar, i generen en sèrie amb una turbina de gas i una turbina de vapor. Permeten més flexibilitat en el funcionament, però a costa de baixar el rendiment, per la qual cosa principalment haurien de funcionar a càrrega màxima llevat de situacions especials de mercat.

Quan la demanda és molt forta, els mètodes per cobrir-la són els més costosos, turbines de gas i tèrmiques de fuel i gas. Alguns són molt flexibles, com les turbines de gas, però el cost de producció les fa prohibitives llevat dels casos d'emergència. Queda la hidràulica amb regulació per cobrir la resta de la demanda, llevat de les puntes per a les quals es reserven els bombaments reversibles, que han utilitzat energia de les hores valls per emmagatzemar l'aigua en els seus dipòsits superiors.



Diàriament es fa una previsió de la demanda i l'energia renovable disponible per al dia següent. Les eòliques tenen una gran dispersió en aquestes previsions, per la qual cosa es necessita un altre tipus d'energia que estigui sempre disponible per cobrir aquestes mancances. Aquesta energia de socors és la hidràulica amb regulació, els bombaments reversibles i les turbines de gas, perquè poden generar amb molta rapidesa partint fins i tot d'una parada total.

L'augment de l'energia eòlica en el sistema elèctric espanyol ha comportat, per tant, incrementar paral·lelament la regulació que només es pot resoldre amb la hidràulica regulable i els bombaments reversibles.

Cal esmentar que al mercat espanyol les centrals s'acoblen a la xarxa mitjançant un sistema que permet que cada hora entrin a generar les centrals que hagin ofert un preu més baix, i es pot variar aquest esquema perquè és merament tècnic. De tota manera en la realitat l'economia i la tècnica estan molt ben aïngudes, i la situació diària és molt similar a l'esmentada.

### 3.3

#### Aspectes econòmics

Quan s'analitza econòmicament qualsevol inversió en aprofitaments hidroelèctrics, s'han de tenir en compte els aspectes següents:

- El cost de la instal·lació
- La durada de les obres
- La producció estimada
- Les despeses de manteniment
- Els ingressos per venda d'energia
- La durada de les instal·lacions i/o concessió
- El cost del capital
- El marc que regula el mercat elèctric

La problemàtica que pot aparèixer per conèixer amb una precisió relativa la rendibilitat d'un aprofitament deriva de la incertesa amb què es fan servir aquests paràmetres. El cost de la instal·lació, per ser una construcció lineal amb molta obra civil, pot tenir imponderables que no es coneixeran fins que no s'acabi. A més, quan les obres duren molt cal tenir en compte

els interessos intercalars que incrementen notablement els costos.

La producció mitjana es pot conèixer amb relativa precisió amb les aportacions (cabals) d'anys anteriors, però en alguns casos la falta de dades o la inexactitud d'aquestes dades poden donar resultats erronis. Cal tractar aquest capítol amb especial cura i rigor per aproximar-se tant com sigui possible a la realitat futura. A més, la dispersió climàtica d'uns anys respecte als altres s'accentua molt al nostre país, i és normal trobar períodes de tres anys o més secs o humits, que poden modificar tots els càlculs sobre la rendibilitat, càlculs que poder ser molt favorables quan els primers anys d'exploració són els humits i nefastos quan no ho són.

Les despeses de manteniment sí que se solen conèixer. Depenen de l'organització que tingui cada companyia, fins i tot es poden contractar exteriorment quan la societat sigui petita, i en general es donen uns serveis satisfactoris amb uns costos perfectament assumibles.

Els ingressos per venda d'energia generada deriven de la producció, com ja s'ha comentat anteriorment, i del preu unitari de venda, preu que es coneix a curt termini, però amb el temps es distorsiona i és difícil preveure com serà anys més tard.

Els aprofitaments hidroelèctrics poden tenir una vida molt llarga si estan ben construïts i reben el manteniment adequat. És molt normal veure funcionar correctament grups hidràulics amb més de 80 anys, i fins i tot amb més de 100. En general és fàcil que durin tot el període de concessió (en l'actualitat, 40-45 anys) i que l'acabin en un correcte estat de funcionament.

Les modernitzacions dels equips hidroelèctrics antics se centren en les automatitzacions perquè funcionin sense personal. Se solen posar ordinadors que controlen tots els processos normals de funcionament, i cada cert període de temps s'han de canviar ja que la tecnologia en aquest camp avança a passos de gegant i amb uns preus molt competitius. Ara bé, els problemes de costos són ben coneguts i tenen la mateixa consideració com en qualsevol altre negoci.

Quant al marc regulatori, és un dels punts fonamentals que decideixen si s'ha de construir o no un deter-

Quadre 1

Centrals hidràuliques a Catalunya					
Central	Potència (MW)	Prod. mitjana anual (GWh)	Tipus	Riu	Província
Aiguamoix	32,00	54,90	Regulació	Garona Aiguamoix	Lleida
Arties	71,50	109,40	Regulació	Llacs capçalera	Lleida
Pont de Rei	40,70	111,70	Regulació	Garona Toran	Lleida
Caldes	34,00	95,40	Regulació	Noguera de Tort	Lleida
Moralets	219,10	114,40	Bombament	Noguera Ribagorçana	Lleida - Ossa
Escales	36,00	112,80	Regulació	Noguera Ribagorçana	Lleida
Montanyana	44,50	205,70	Regulació	Noguera Ribagorçana	Lleida
Canelles	108,00	131,10	Regulació	Noguera Ribagorçana	Lleida
Santa Anna	304,00	55,60	Regulació	Noguera Ribagorçana	Lleida
Esterri	27,51	52,20	Fluent	Noguera Pallaresa	Lleida
Tavascan sup.	119,60	83,70	Regulació	Noguera de Cardós	Lleida
Tavascan inf.	31,11	67,00	Regulació	Noguera de Cardós	Lleida
Montamara	90,00	28,20	Bombament	Noguera de Cardós	Lleida
Llavorsí	54,80	133,30	Regulació	Noguera de Cardós	Lleida
Sallent	468,00	116,50	Bombament	Flamisell	Lleida
Capdella II	31,75	52,70	Regulació	Flamisell	Lleida
Talarn II	35,20	128,00	Regulació	Noguera Pallaresa	Lleida
Terradets	32,50	69,40	Regulació	Noguera Pallaresa	Lleida
Camarasa	60,00	173,60	Regulació	Noguera Pallaresa	Lleida
Oliana	37,89	109,40	Regulació	Segre	Lleida
Rialb	34,00	100,00	Regulació	Segre	Lleida
Seròs II	44,60	145,70	Fluent	Segre	Lleida
Ribarroja	262,80	661,20	Regulació	Ebre	Tarragona
Flix	42,52	221,20	Regulació	Ebre	Tarragona
Sau	52,00	80,70	Regulació	Ter	Barcelona
Susqueda	86,30	174,30	Regulació	Ter	Barcelona

minat aprofitament. El problema rau en què els sistemes de remuneració i primes varien amb una freqüència relativa, per tant, només és possible conèixer-los a curt termini, i fer suposicions del que serà en el futur.

Actualment, la remuneració en règim especial es fonamenta en el Reial decret 661/2007, de 25 de maig, segons el qual les centrals amb menys de 10 MW cobren el preu mitjà del sector més una prima per MWh, prima que es redueix linealment fins a desaparèixer per a potències superiors a 50 MW. Els valors mitjans per al 2008 són d'entre 90 i 100 per MWh.

És difícil entendre per què per a nous aprofitaments es discriminin els preus de l'energia d'aquesta manera, ja que es penalitza algun aprofitament de major potència que no es pot construir sense ajut, i tanmateix

s'afavoreix els més petits. L'energia que es produeix és de la mateixa qualitat independentment de la potència que es tingui. D'altra banda, les grans centrals amb regulació tenen altres elements remuneradors afegits als propis de l'energia que produeixen, derivats de la discriminació horària de preus i de la regulació del sistema que efectuen.

### 3.4

#### Principals centrals hidràuliques a Catalunya

El potencial hidroelèctric total instal·lat a Catalunya és de 29 hidràuliques fluents, amb una potència total de 330 MW i una producció mitjana per any de 1.350 GWh; 30 hidràuliques amb regulació, amb una po-

Quadre 2

Elements contaminants i sistemes de producció d'electricitat				
Opció	Emissions de gasos efectes hivernacle (Kt eq. CO <sub>2</sub> /TWh)	Emissions de SO <sub>2</sub> (t SO <sub>2</sub> /TWh)	Emissions de NO (t NO <sub>x</sub> /TWh)	Emissió de partícules (t/TWh)
<b>Opcions que poden fer front a la base i a les puntes de la corba de càrrega</b>				
Hidroelèctrica amb regulació	2-48	5-60	3-42	5
Dièsel	555-883	84-1.550	316-12.300	122-213
<b>Opcions que poden fer front a la base de la corba de càrrega i de flexibilitat limitada</b>				
Hidroelèctrica fluent	1-18	1-25	1-68	1-5
Carbó bituminós: planta moderna	790-1.182	700-32.321	700-5.273	30-663
Fuel sense processar	686-726	8.013-9.595	1.386	
Biomassa: combustió de deixalles forestals	15-101	12-140	701-1.950	217-320
Cicle combinat	389-511	4-15.000	13-1.500	1-10
Nuclear	2-59	3-50	2-10	2
Lignit: aigua antiga	1.147-1.272	600-31.941	704-4.146	100-618
<b>Opcions intermitents que requereixen energies de suport</b>				
Eòlica	7-124	21-87	14-50	5-35
Solar fotovoltaica	13-731	24-490	16-340	12-190

Font: Agència Internacional de l'Energia, 2000.

tència total de 1.700 MW i una producció mitjana per any de 3.760 GWh; i 3 bombaments reversibles, amb una potència total de 755 MW i una producció mitjana per any de 1.000 GWh. En el quadre 1 s'enumeren les centrals amb més de 25 MW de potència i se'n indiquen les característiques principals.

### 3.5

#### Energia hidroelèctrica i medi ambient

L'energia hidràulica és la menys contaminant de tots els sistemes de producció d'energia elèctrica; en el quadre 2, realitzat per l'Agència Internacional de l'Energia, es pot apreciar els principals elements contaminants dels diferents sistemes de producció d'electricitat.

El valor mínim correspon al valor produït durant l'explotació i el valor màxim correspon a tota la cadena productiva inclosos la construcció i el manteniment.

És extraordinàriament interessant analitzar la informació del quadre des de la perspectiva de la seva influència en el fenomen de l'escalfament global i el consegüent canvi climàtic.

No ens centrarem en els valors absoluts de contaminació de les energies fòssils, perquè des que es va publicar la informació aquestes emissions s'han reduït molt i seria injust penalitzar-les.

Si es compara l'energia hidroelèctrica amb els altres grups d'energia renovable s'observa que els valors menors es donen en la hidroelèctrica fluent. Es pot apreciar que contamina set vegades menys que l'eòlica, tretze vegades menys que la fotovoltaica i quinze vegades menys que la biomassa. La segona font d'energia menys contaminant és la hidràulica amb regulació, sens dubte com a conseqüència de les grans obres hidràuliques que és necessari construir per aconseguir emmagatzemar i regular l'energia elèctrica.

### 3.6

#### Aspectes positius i aspectes negatius de l'energia hidràulica

D'entre els aspectes positius de la pròpia energia cal destacar que es tracta d'una energia renovable no contaminant que, a més, es pot emmagatzemar, com l'aigua en dipòsits elevats, i per tant permet regular el

sistema elèctric compensant les fluctuacions de les energies eòlica i solar. I és una reserva d'energia utilitzable a l'instant (reserva freda). D'altra banda, els embassaments adscrits a les centrals amb regulació permeten regular els cabals per a altres usos com l'abastament a poblacions, regadius, etc. Finalment, permeten la laminació d'avingudes, reduint els cabals de les grans crescudes en les poblacions situades aigües a baix.

Els aspectes negatius principalment són els derivats de la construcció de les grans obres hidràuliques:

- *Afecció a persones.* Poblacions, cultius, indústries, etc. Es resolen econòmicament o amb permutes. En alguns casos aspectes com els sentiments i l'afecció al terreny són molt difícils o impossibles de resoldre.
- *Sedimentació en embassaments.* Els materials que arrossegueu els rius es dipositen als embassaments sense arribar a les zones de sedimentació, i amb això es talla el cicle natural. És difícil resoldre el problema, ja que les solucions que es promulgaven fa cinquanta anys d'obrir els desguassos de fons en el cas de les crescudes per evacuar els sediments no són vàlides en l'actualitat, perquè comporta una elevada mortaldat en la fauna piscícola. L'alternativa de retirar el sediment i dipositar-lo en barrancs per a l'ús agrícola és una solució costosa i que no s'utilitza.
- *Afeccions a la fauna i flora.* La flora que es trobi a l'interior de l'embassament s'ha de retirar abans d'omplir-lo, i per compensar-ho la solució és plantar un nombre igual o més gran de la mateixa espècie en zones properes. Per a la fauna piscícola, els embassaments són una barrera difícil de traspasar, per això se solen disposar d'escales de peixos en preses petites, i ascensors quan el desnivell és més gran; de tota manera hi ha una alteració en la vida d'aquests éssers amb un canvi d'hàbitat total i absolut, ja que disposen d'espais més grans creats pels embassaments però menys mobilitat al llarg del riu. Per a la fauna aviària els embassaments solen ser favorables, ja que són zones d'aigua segures per al descans i l'avitual·la-

ment de les espècies emigrants. Quant a la fauna animal, hi ha algunes espècies desplaçades, sobretot les que tenen l'hàbitat a la vora del riu; d'altres, però, se'n veuen afavorides perquè sempre tenen aigua segura.

- *Modificació de la climatologia.* La formació de grans masses d'aigua implica una reducció de les temperatures extremes, però amb més percentatges d'humitat, percentatges que solen crear una sensació desagradable.

### 3.7

## Producció hidroelèctrica a Espanya

El 2007 la producció hidroelèctrica a Espanya va ser de 26.352 GWh en règim ordinari i de 3.965 GWh en règim especial (minicentrals). L'any 2008 la producció en règim ordinari va ser de 21.175 GWh, i no hi ha dades definitives del règim especial (informació obtinguda de REE).

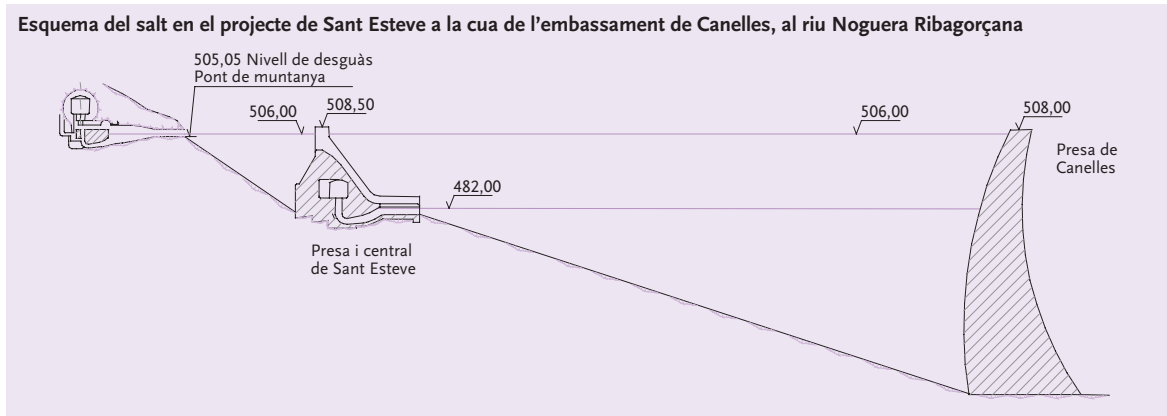
Aquesta quantitat d'energia produïda permet evitar anualment (2007) el llançament a l'atmosfera de 13,65 milions de tones de CO<sub>2</sub>, si se suposa un desplaçament de la producció amb cicles combinats.

### 4

## Futur

Els aprofitaments hidroelèctrics més grans i més rendibles ja s'han construït; a Catalunya i a Espanya no és possible trobar nous emplaçaments de salts convencionals que tinguin una rendibilitat similar als ja existents. Els pocs aprofitaments que queden per construir tenen generalment incidències mediambientals que en compliquen el desenvolupament. Tanmateix la societat exigeix la utilització extrema de tots els recursos renovables, la qual cosa, en moltes ocasions, s'enfronta amb el propi sistema que no permet canvis en les estructures ambientals. El futur ha de ser de consens, i cal cedir en alguns aspectes mediambientals per aconseguir una major penetració de les energies netes i renovables.

Gràfic 5



En l'aspecte energètic, en el futur l'energia hidroelèctrica ha de continuar amb el paper regulador actual, encara que amb un grau d'actuació superior, atès el major nombre de factors que intervindran en la producció derivats de l'increment de la penetració d'eòliques i solars. Les futures actuacions en el camp de l'energia hidràulica tindran una orientació centrada en la regulació i no en la producció fluent com existia en el passat. El matrimoni obligat eòlic-hidràulic cobrirà gran part de la demanda d'energia sense necessitar d'altres mitjancers per garantir un subministrament adequat amb una qualitat total.

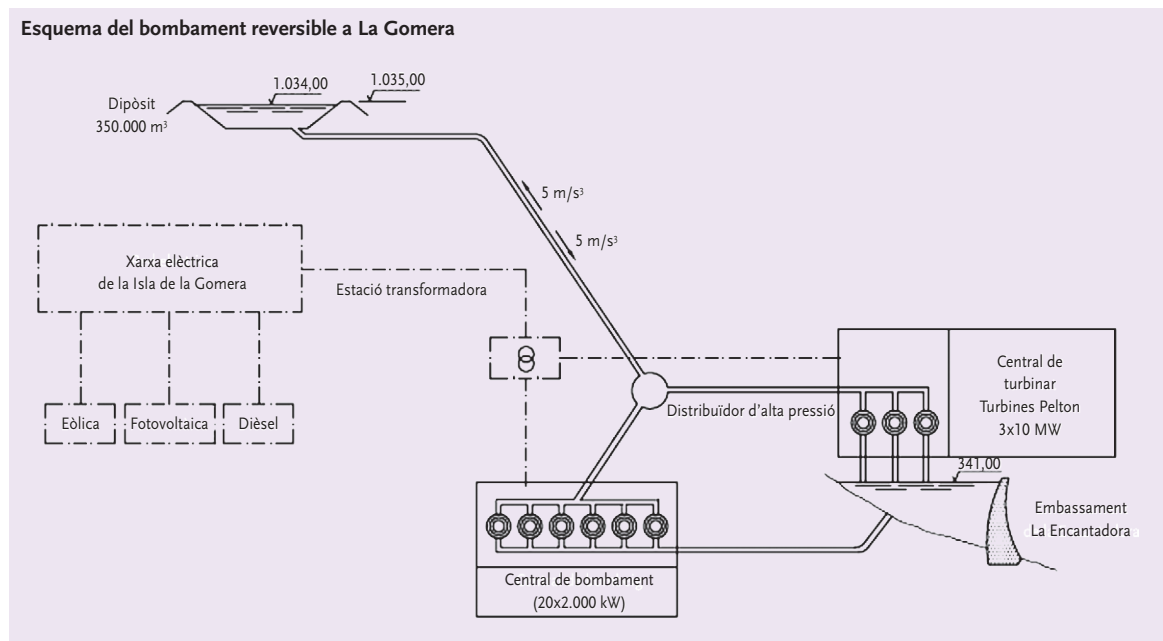
Les tendències hidroelèctriques futures se centraran suposadament en quatre tipus de projectes en els quals convergeix la regulació, l'eficiència energètica i l'abastament integral amb energies renovables; repotenciacions, bombaments reversibles, cues d'embassament i sistemes renovables integrals en illes:

- La repotenciació consisteix a incrementar la potència en salts amb regulació, disposant de nous grups que funcionin en paral·lel amb els existents. La producció global no augmenta, però permet una concentració de l'energia en els moments de més demanda i una regulació constant del sistema elèctric. Aquest plantejament no és nou i ja s'ha fet a les centrals més importants, però s'estima que encara queden centrals en les quals pot ser adequat implantar-lo. La tendència és aconseguir

nivells de potència per a una utilització a ple rendiment equivalent d'unes 1.200 hores anuals.

- Els bombaments reversibles seran una clara resposta a la regulació i a l'emmagatzemament d'energia necessària perquè puguin entrar en servei els nous parcs d'aerogeneradors i d'energia solar. És difícil donar xifres sobre la necessitat que hi haurà en el futur, però si suposem una necessitat d'1 MW hidràulic amb regulació per cada 5 MW de renovables no regulades, és possible fer-se una idea de quins seran els nivells en el futur: uns 8.000 MW per al 2030.
- Les cues d'embassament no formen part del grup per incrementar la regulació, però sí que permetran una major eficiència energètica en aquest tipus d'aprofitaments. Es fonamenten en la construcció d'un petit embassament dins d'un de més gran de manera que es pugui utilitzar el salt que es perd com a conseqüència de l'oscil·lació de l'embassament necessària per a la regulació. L'energia produïda és del tipus fluent o amb lleugera regulació, però sempre renovable i així s'eviten emissions de CO<sub>2</sub> de l'energia que substitueixen. En l'esquema del gràfic 5 se'n pot apreciar la disposició.
- Els sistemes integrals en illes seran l'aposta futura per a un total subministrament d'energia renovable en sistemes aïllats. Consisteix a disposar un

Gràfic 6



binomi energètic: per una banda, uns elements renovables subministradors d'energia bàsica formats per aerogeneradors i per sistemes solars i fotovoltaics i, per altra banda, un sistema d'emmagatzematge i regulació format per una central de bombament reversible. La central hidràulica ha d'estar funcionant en règim de generació contínuament per regular la xarxa del sistema, i en règim de bombament només quan hi hagi excedent d'energia subministrada pels generadors bàsics.

Amb aquests sistemes es podrà alimentar d'energia totes les illes que disposin de sol, vent i uns nivells adequats per construir-hi una central de bombament.

Es pot apreciar el distribuïdor d'alta pressió que permetrà bombar i generar alhora amb una única canonada forçada (tallacircuit hidràulic).

Un altre front on es podrà actuar és en l'augment de rendiment de les màquines hidràuliques, que ja és molt elevat però té un petit marge que es pot aprofitar

gràcies a les noves tecnologies de disseny. Les turbines antigues tenien rendiments de fins al 85%, però les modernes arriben fins al 95%. Les actuacions que cal fer se centren en el disseny del rodet i en modificacions geomètriques del con d'aspiració. En el primer cas les millores són simples però costoses ja que el rodet és una de les peces més cares de la turbina; el més normal és canviar la peça per una de disseny modern aprofitant el moment en què s'ha de fer una gran reparació, d'aquesta manera el cost disminueix i alhora es justifica per un rendiment millor. En el cas del con d'aspiració, les modificacions són més complicades ja que comporten canvis de geometria a l'obra civil, però és interessant analitzar aquesta possibilitat per la gran millora que és possible d'obtenir.

Quant als dissenys de les turbobombes dels bombaments, la tecnologia ha millorat molt en els últims 25 anys, no solament per l'augment dels rendiments sinó també per la possibilitat de regular els bombaments utilitzant una velocitat variable en els grups amb una electrònica molt sofisticada.

L'automatització i el control dels equips hidràulics no és nova, però en aquest camp encara queden millores per realitzar que avancen paral·lelament a la tecnologia dels equips informàtics.

És interessant esmentar el present i el futur de la informació hidrogràfica de què es disposa de les conques espanyoles mitjançant el sistema SAIH (Sistema Automàtic d'Informació Hidrològica) implantat fa pocs anys, que permet conèixer tots els paràmetres meteorològics, hidrològics i l'estat de càrrega dels principals embassaments de les conques. Encara queden algunes zones per cobrir que es preveu que ho estiguin aviat.

## 5

### Conclusions

El binomi aigua i energia és molt antic, però continua sent d'extrema actualitat. L'aigua és necessària en alguna mesura per a tots els processos de producció d'energia elèctrica. L'energia hidroelèctrica és la renovable de més qualitat per les baixes emissions que emet a l'atmosfera i per la flexibilitat en la producció d'electricitat.

Seria ideal tenir cobert tot el subministrament d'energia elèctrica amb centrals hidràuliques, però a Espanya el potencial rendible és complet, només és possible construir centrals de bombament o millorar les que ja hi ha.

És molt difícil construir noves centrals hidroelèctriques ja que els emplaçaments que queden tenen problemàtica mediambiental o la seva rendibilitat està per sota del que es permet. Per això seria oportú reconsiderar aquesta situació per arribar a un consens i poder construir les centrals que fossin més convenients.

Les centrals de bombament reversibles formen un matrimoni perfecte amb les energies renovables eòlica i solar, ja que en permeten una regulació adequada i, per tant, una gran penetració en el mercat de la producció.

## 6

### Bibliografia

Articles d'opinió. Les colònies industrials del Llobregat. CINTRA: [www.citop.es](http://www.citop.es)

Arxiu històric de FECSA-ENDESA

FECSA (1994). *Les tres xemeneies*.

FLUMEN: [www.flumen.upc.es](http://www.flumen.upc.es)

Forces Elèctriques d'Andorra: [www.feda.ad](http://www.feda.ad)

SAIH Ebre, Confederació Hidrogràfica de l'Ebre: [www.chebro.es](http://www.chebro.es)

Xarxa Elèctrica d'Espanya, REE: [www.ree.es](http://www.ree.es)